DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.265 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

一种高精度并网逆变器频率耦合导纳测量方法

卓浩泽[1]，林 杰[2]，姚文轩[2]，张梓霖[2](中国电源学会学生会员)，
伍文华[2](中国电源学会会员)，莫枝阅[1]
(1.广西电网有限责任公司电力科学研究院，南宁 530023；2.湖南大学电气与信息工程学院，长沙 410082)

摘要：实现并网逆变器的导纳测量对于新能源并网稳定性分析起着关键作用，基于此提出一种高精度并网逆变器频率耦合导纳的测量方法。首先，将基于扰动注入的导纳测量过程看作确定性分量的测量过程；然后，通过将扰动注入后的信号看作宽频带信号，提出了基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法；最后，搭建了基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架。仿真及实验结果表明，相比于现有方法，所提方法能实现宽频带信号的精确测量，在多种电网频率场景下可以准确测得频率耦合导纳特性，对于确定性分量的测量有着较好的适用性。

关键词：导纳测量；频率耦合；逆变器；宽频带信号测量

High-precision Measurement Method for Frequency Coupling Admittance of Grid-connected Inverter

ZHUO Haoze[1], LIN Jie[2], YAO Wenxuan[2], ZHANG Zilin[2], *Student Member*, *CPSS*,
WU Wenhua[2], *Member*, *CPSS*, MO Zhiyue[1]
(1. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The admittance measurement of grid-connected inverters plays a crucial role in the stability analysis of renewable energy grid-connection. On this basis, a high-precision measurement method for the frequency coupling admittance of a grid connected inverter is proposed. First, the admittance measurement process based on disturbance injection is taken as a measurement process of deterministic components. Then, the signal with disturbance injection is considered as a broadband signal, and a method for measuring deterministic components of the broadband signal based on polynomial fitting is put forward. Finally, a frequency coupling admittance measurement framework for the inverter based on deterministic components is established. Simulation and experimental results show that compared with the existing methods, the proposed method can achieve high-precision measurement of broadband signals and accurately measure the frequency coupling admittance characteristics in various grid frequency scenarios, indicating its good applicability for the measurement of deterministic components.

Keywords: Admittance measurement; frequency coupling; inverter; broadband signal measurement

随着我国能源结构转型过程的不断推进，风电光伏装机容量持续增长。大力推进可再生能源的开发和利用，促进高比例可再生能源并网消纳，对于新型电力系统的发展和运行有着重要意义[1-3]。风电、光伏等新能源装备并网伴随着逆变器等电力电子设备的大规模应用，逆变器与弱电网、逆变器与

收稿日期：2024-06-20；**修回日期**：2024-07-25，2024-08-09；
录用日期：2024-08-27；**网络首发日期**：2024-10-21
基金项目：广西电网公司科技资助项目(GXKJXM20222061)
This work is supported by Guangxi Power Grid Co., Ltd. under the grant GXKJXM20222061

逆变器之间的交互作用愈发强烈，引发的宽频带振荡问题日益突出[4-5]。为分析逆变器并网振荡问题，通常从小扰动稳定性的角度展开研究，其中阻抗分析法是常用的小扰动稳定性分析方法[6-8]。阻抗分析法通过将逆变器和电网看作 2 个独立的系统，在施加小扰动信号测量出逆变器和电网的端口外特性后，通过阻抗稳定性判据来分析系统稳定性[9]。因此，实现新能源发电装备的阻抗/导纳测量是新能源并网稳定性分析过程的重要环节。

目前，针对新能源发电装备的阻抗/导纳测量的相关研究有扰动注入信号类型[9-11]、扰动注入方式[12-14]和扰动测量方法[15-17]等。其中，扰动注入信号类型可以分为啁啾信号、多频谱信号、方波信号和正弦信号等。相比于啁啾信号等具有多频谱特性的信号，正弦信号注入能有效避免信号之间的相互干扰，是常采用的扰动注入信号[9]。扰动注入方式可以分为并联电流扰动注入和串联电压扰动注入 2 种。考虑到并联电流扰动注入时扰动电流主要流向电网侧，为减小扰动注入信号对电网的影响，一般仅考虑串联电压扰动注入方式。

在宽频带扰动信号测量方法方面，快速傅里叶变换 FFT (fast Fourier transform)因其原理简单、计算速度快是阻抗/导纳测量常用的方法，然而，受电网频率波动影响，FFT 方法由于频谱泄露等问题，测量精度受到限制[15]。文献[15]通过基于加窗傅里叶变换的方法提高了阻抗检测精度；文献[16]将谱线校正和基于电网基波校正的相位校正技术应用于频率耦合导纳测量中，提升了相角的测量精度，然而这些方法对于导纳测量的精度提升有限。考虑到基于扰动注入的导纳测量是在待测信号已知的条件下进行的，因此可以将导纳测量过程看作是确定性分量的测量过程。有必要提出一种高精度确定性分量测量方法，以保证逆变器频率耦合导纳的精确测量。

为解决因电网频率变化导致并网逆变器导纳测量精度低的问题，本文提出一种高精度并网逆变器频率耦合导纳的测量方法。首先通过将导纳测量看作是确定性分量的测量问题，指出实现高精度导纳测量精度的关键点；然后推导了基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法，并利用频率修正模型对结果进行快速修正，建立了确定性宽频带信号测量框架；接着在测量算法的基础上，进一步提出了基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架；最后通过仿真和实验验证了所提方法应用于导纳测量的有效性。

1 逆变器频率耦合导纳测量原理

通过频率耦合导纳测量装备测量待测并网逆变器导纳的原理如图 1 所示。图中：u_a、u_b、u_c和i_a、i_b、i_c分别为逆变器侧电压和电流信号；f_p为正序频率；f_{p1}为负序频率，$f_{p1}=f_p-2f_n$，f_n为电网基频频率。

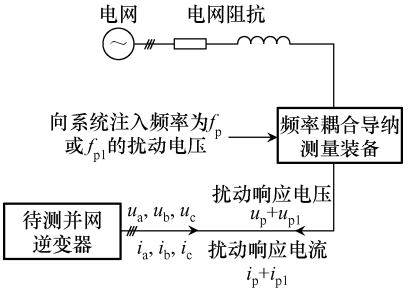


图 1 并网逆变器频率耦合导纳测量原理

Fig. 1 Principle of frequency coupled admittance measurement for grid-connected inverter

当测量装备向待测逆变器注入频率为 f_p 或 f_{p1} 的小扰动电压时，逆变器侧电压电流信号在f_p和f_{p1}处会出现相应的扰动分量 u_p、u_{p1} 和 i_p、i_{p1}，这些分量之间的关系[18]为

$$-\begin{bmatrix}\dot{I}_p\\ \dot{I}_{p1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_p\\ \dot{U}_{p1}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\dot{I}_p$、$\dot{I}_{p1}$分别为电流在频率 f_p、f_{p1} 处对应的相量；Y_{11}、Y_{12}、Y_{21}、Y_{22} 组成待测逆变器 f_p 对应的频率耦合导纳矩阵，Y_{11} 和 Y_{22} 为自导纳、Y_{12} 和 Y_{21} 为互导纳；$\dot{U}_p$、$\dot{U}_{p1}$ 为电压在 f_p、f_{p1} 处对应的相量。

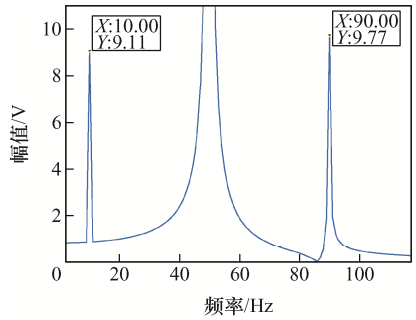
当仅已知 $\dot{I}_p$、$\dot{I}_{p1}$ 和 $\dot{U}_p$、$\dot{U}_{p1}$ 时，式(1)中 2 个方程并不能求解出导纳矩阵，为此通常需要进行 2 次

线性独立的扰动注入[19]，可以得到

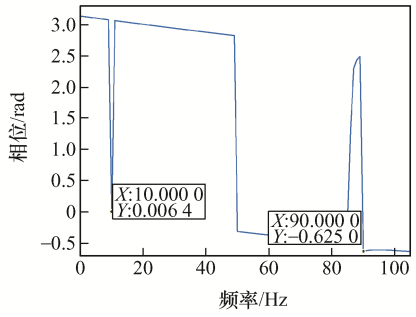
$$-\begin{bmatrix}\dot{I}_{\mathrm{p}} & \dot{I}'_{\mathrm{p}}\\ \dot{I}_{\mathrm{p1}} & \dot{I}'_{\mathrm{p1}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_{\mathrm{p}} & \dot{U}'_{\mathrm{p}}\\ \dot{U}_{\mathrm{p1}} & \dot{U}'_{\mathrm{p1}}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，$\dot{U}'_{\mathrm{p}}$、$\dot{U}'_{\mathrm{p1}}$ 和 $\dot{I}'$、$\dot{I}'_{\mathrm{p1}}$ 分别为第二次注入小扰动电压后逆变器侧产生的电压和电流分量。通过对式(2)进行矩阵运算，即可求解出导纳矩阵。

可见，实现并网逆变器频率耦合导纳精确测量的关键在于小扰动注入后产生的电压和电流扰动分量的测量。FFT 是导纳测量过程中电压和电流相量常用的提取方法，然而这种方法会因为实际 f_{n} 波动出现频谱泄露和栅栏效应，导致测量精度明显降低。例如，通过 100 kHz 的采样频率对有效值为 220 V、电网基频频率为 49.9 Hz，同时含幅值为 10 V、频率为 10.0 Hz 和 89.8 Hz 扰动的电压信号进行采样，FFT 分析的幅频特性和相频特性分别如图 2(a)和(b)所示。受频谱泄露的影响，通过 FFT 提取的扰动信号幅值偏差有 0.89 V、相位偏差有 0.625 0 rad，这会直接影响式(2)中的电压相量，导致导纳测量结果出现偏差。



(a) 频率偏移下的幅频特性



(b) 频率偏移下的相频特性

图 2　基频发生偏移时 FFT 测量结果

Fig. 2 Measurement result based on FFT when fundamental frequency shifts

为减小频谱泄露和栅栏效应的影响，文献[15-16]通过加窗和谱线校正等方法，提升了测量精度，然而这些方法的适用场景有限。考虑到图 1 中小扰动电压频率是给定的，因此导纳测量可以看作对确定性分量的测量，即 2 次扰动注入频率 f_{p} 和 f_{p1} 都是已知的，导纳测量的关键在于对这 2 个频率对应的电压和电流的测量。基于此，本文考虑从确定性分量测量的角度出发，提出一种高精度导纳测量方法。

2　基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量原理

当图 1 中导纳测量装备向待测逆变器注入 1 个扰动信号(如 30 Hz 信号)时，逆变器端口会响应出 2 个频率分别为 30 Hz 和 $2f_{\mathrm{n}}$−30 Hz 的扰动响应电压，如图 3 所示，此时含有多个频率分量的信号可以看作宽频带信号。由于响应信号的频率是确定的，故这些频率分量可以看作确定性分量，而本文要测量的对象即为宽频带信号中确定性分量的幅值、相角。

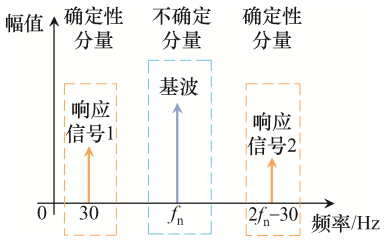


图 3　施加扰动后的宽频带信号频谱

Fig. 3 Spectrum of broadband signal when disturbance is added

通常，含多个频率分量的信号模型 $x_w(t)$可表示为

$$x_w(t)=\sqrt{2}X_0(t)\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t+\varphi_0(t))+\sqrt{2}\sum_{m=1}^{M}X_m(t)\cos(2\pi f_m t+\varphi_m(t))+\eta(t) \tag{3}$$

式中：$X_0(t)$和 $\varphi_0(t)$分别为随时间变化的基频信号幅值和相角；M 为除基频外其他分量的个数；$X_m(t)$、f_m 和 $\varphi_m(t)$分别为第 m 个分量的幅值、频率和相角；$\eta(t)$为噪声。式(3)中，每个频率分量对应的幅值、相角均是待求解的值。

参考基频信号可以通过多项式的方法逼近[20]，即对于一个仅含基频信号的模型 $x(t)$，可以通过关于时间 t 的多项式来逼近，即

$$x(t)=\sqrt{2}X_0(t)\cos[2\pi f_{\mathrm{n}}t+\varphi_0(t)]\approx\sqrt{2}(A_0+A_1t+\cdots+A_nt^n)\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t)-\sqrt{2}(B_0+B_1t+\cdots+B_nt^n)\sin(2\pi f_{\mathrm{n}}t) \tag{4}$$

式中：n 为多项式的最高次数；A_0~A_n、B_0~B_n 为拟合基频分量的 n 次多项式系数。式(4)中，f_{n} 初值取 50 Hz，$x(t)$、t 和 n 均直接给定，因此可以通过最小二乘法求解出多项式系数 A_0~A_n、B_0~B_n，再用多项式系数来求解幅值和相角。由于式(4)中 $X_0(t)$和 $\varphi_0(t)$短时间内变化极小，因此用多项式逼近 $X_0(t)\cos[\varphi_0(t)]$和 $X_0(t)\sin[\varphi_0(t)]$较为简单。

依次对式(3)中 M+1 个频率信号进行多项式逼近，可以得到 $x_w(t)$的多项式拟合模型为

$$x_w(t)\approx\sqrt{2}[(A_{00}+A_{01}t+\cdots+A_{0n}t^n)\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t)-(B_{00}+B_{01}t+\cdots+B_{0n}t^n)\sin(2\pi f_{\mathrm{n}}t)+\sum_{m=1}^{M}[(A_{m0}+A_{m1}t+\cdots+A_{mn}t^n)\cos(2\pi f_mt)-(B_{m0}+B_{m1}t+\cdots+B_{mn}t^n)\sin(2\pi f_mt)] \tag{5}$$

式中：A_{00}~A_{0n}、B_{00}~B_{0n} 为拟合基频分量的 n 次系数；A_{m0}~A_{mn}、B_{m0}~B_{mn} 为拟合第 m 个非基频分量的 n 次系数。式(5)可简化为

$$x_w(t)\approx\boldsymbol{p}(t)\cdot\boldsymbol{H} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{p}(t)$为频率的正余弦函数与时间函数相乘的矩阵；$\boldsymbol{H}$ 为多项式系数矩阵。$\boldsymbol{p}(t)$和 $\boldsymbol{H}$ 的具体表达式分别为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{p}(t)=[&\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ -\sin(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ t\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ -t\sin(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ \cdots\ t^n\cos(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ -t^n\sin(2\pi f_{\mathrm{n}}t)\ \cdots\\ &\cos(2\pi f_mt)\ -\sin(2\pi f_mt)\ t\cos(2\pi f_mt)\ -t\sin(2\pi f_mt)\ \cdots\ t^n\cos(2\pi f_mt)\ -t^n\sin(2\pi f_mt)\ \cdots\\ &\cos(2\pi f_Mt)\ -\sin(2\pi f_Mt)\ t\cos(2\pi f_Mt)\ -t\sin(2\pi f_Mt)\ \cdots\ t^n\cos(2\pi f_Mt)\ -t^n\sin(2\pi f_Mt)]\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}=\sqrt{2}[&A_{00}\ B_{00}\ A_{01}\ B_{01}\ \cdots\ A_{0n}\ B_{0n}\ \cdots\\ &A_{m0}\ B_{m0}\ A_{m1}\ B_{m1}\ \cdots\ A_{mn}\ B_{mn}\ \cdots\\ &A_{M0}\ B_{M0}\ A_{M1}\ B_{M1}\ \cdots\ A_{Mn}\ B_{Mn}]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{8}$$

当每个分量频率的初值都确定时，$\boldsymbol{p}(t)$即可确定，通过最小二乘法可以求解出 $\boldsymbol{H}$ 为

$$\boldsymbol{H}=\{[\boldsymbol{p}(t)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}(t)\}^{-1}[\boldsymbol{p}(t)]^{\mathrm{T}}x_w(t) \tag{9}$$

参考基频信号的幅值、相角可以用多项式系数求解[20]。在确定 $\boldsymbol{H}$ 后，信号中每个分量的幅值、相角和频率的求解公式分别为

$$X'_m=\sqrt{A_{m0}^2+B_{m0}^2} \tag{10}$$

$$\varphi'_m=\arctan(B_{m0}/A_{m0}) \tag{11}$$

$$f'_m=f_m+\Delta f_m=f_m+\frac{B_{m1}A_{m0}-A_{m1}B_{m0}}{2\pi(A_{m0}^2+B_{m0}^2)} \tag{12}$$

式中：X'_m、φ'_m、f'_m 分别为每个分量对应的幅值、相角、频率；Δf_m 为频率修正量。X'_m 和 φ'_m 即为式(2)中待求电压和电流相量的幅值和相角。

基于上述原理，本文提出基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法。该方法能根据已知的 f_m 确定 $\boldsymbol{p}(t)$，并通过最小二乘法求解 $\boldsymbol{H}$，继而通过多次迭代计算实现确定性分量的精确测量。所提方法的流程如图 4 所示。

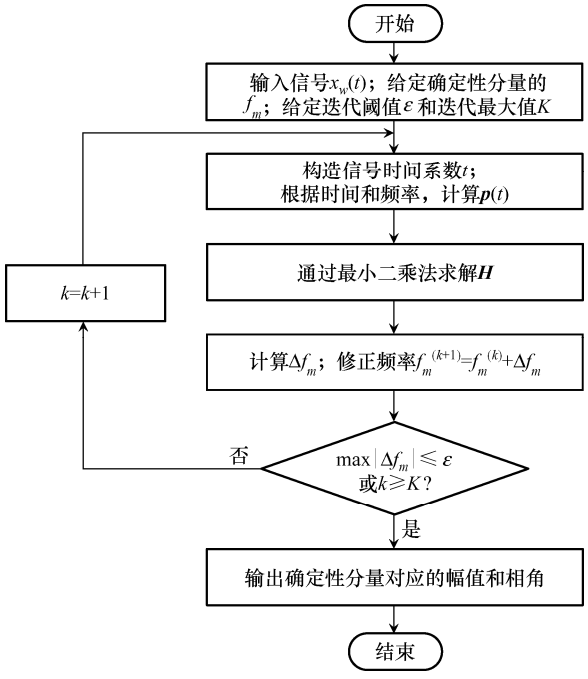


图 4 基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法流程

Fig. 4 Measurement procedure for deterministic components of broadband signal based on polynomial fitting

3　基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架

基于第 1 节的逆变器导纳测量方法和第 2 节提出的基于多项式拟合的确定性宽频带信号测量方法，提出一种基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架，如图 5 所示。

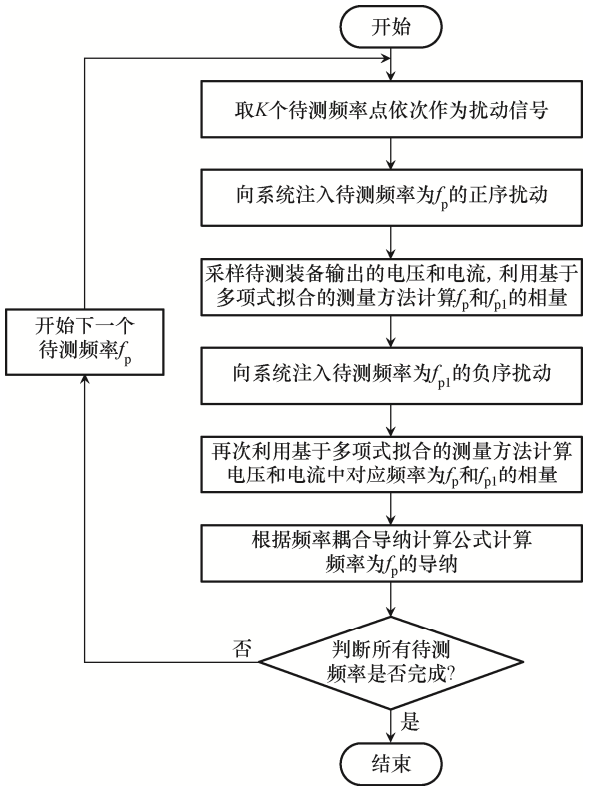


图 5　基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架

Fig. 5 Inverter frequency coupled admittance measurement framework based on deterministic components

所提测量框架的流程为：①在测量频率范围 10~2 000 Hz 内取 K 个待测频率点，作为注入扰动电压的 f_p；②按所取待测频率顺序，注入待测频率为 f_p 的正序扰动电压；③待系统稳定后，对待测装备输出端口的三相电压及三相电流进行采样，通过图 4 所示的基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法流程计算信号中频率为 f_p 和 f_{p1} 的 $\dot{U}_p$、$\dot{U}_{p1}$ 和 $\dot{I}_p$、$\dot{I}_{p1}$；④在系统中重新注入频率为 f_{p1} 的负序扰动；⑤再次对待测电力电子装备三相电压和电流进行采样，并通过宽频带信号测量方法计算 $\dot{U}'_p$、$\dot{U}'_{p1}$ 和 $\dot{I}'_p$、$\dot{I}'_{p1}$；⑥根据所计算的 2 次电压和电流相量，通过对式(2)进行矩阵运算，求解出待测逆变器在 f_p 处的频率耦合导纳；⑦重复②~⑥，完成所有待测频率的测量。

4　仿真及实验验证

为验证所提方法的有效性，首先分析所提宽频带信号方法的测量精度，然后通过 Simulink 仿真对阻感负载和并网逆变器进行导纳测量，最后通过实验平台实现该方法的实际应用。

4.1　算法性能验证

通过在式(3)的 $x_w(t)$ 中考虑多个频率分量，取 10~2 000 Hz 多个频率成分作为测试信号，各频率成分参数见表 1，其中 10 Hz 与 110 Hz、30 Hz 与 70 Hz、1 950 Hz 与 1 850 Hz 形成 3 组频率耦合分量，并将这些分量看作确定性分量、基频信号看作不确定分量。算法参数中取采样率为 100 kHz、时间窗长为 1 s、式(5)的 n 为 2。电网频率分别取 50.0、49.5、49.9、50.1、50.5 Hz，将所提方法与 FFT、文献[16]提出的改进 FFT 方法进行比较，对比结果见表 2。

表 1　宽频带信号测量方法测试参数

Tab. 1 Test parameters used in measurement method for broadband signal

信号频率/Hz	幅值/V	相角/(°)
50	220.0	0
10	3.0	120
30	5.0	30
70	4.0	60
110	4.0	90
1 850	1.5	170
1 950	2.0	150

由表 2 可见，当电网频率不是稳定在 50 Hz 时，FFT 方法的计算结果会有较大偏差，这与图 2 对应的频谱泄露现象是对应的。文献[16]通过谱线插值和相位矫正，提高了 FFT 的测量精度。相比之下，所提方法的测量精度没有明显受到电网频率变化

的影响，可见所提方法能通过多项式拟合精确地逼近该信号。

表 2 不同电网频率下 3 种算法测量结果

Tab. 2 Measurement results obtained using three algorithms at different grid frequencies

算法	电网频率/Hz	最大频率误差/Hz	最大幅值误差/%	最大相角误差/(°)
FFT	50.0	0	1.08×10^{-14}	2.15×10^{-11}
	49.5	0	0.47	79.71
	49.9	0.2	0.22	45.18
	50.1	0.2	0.25	51.69
	50.5	0	0.48	74.76
改进 FFT[16]	50.0	1.07×10^{-5}	1.02×10^{-6}	5.82×10^{-3}
	49.5	3.74×10^{-3}	2.07×10^{-3}	0.74
	49.9	9.92×10^{-7}	7.64×10^{-4}	0.13
	50.1	1.18×10^{-3}	5.38×10^{-4}	0.21
	50.5	3.24×10^{-3}	1.78×10^{-3}	0.64
所提方法	50.0	0	6.51×10^{-14}	9.83×10^{-12}
	49.5	0	9.99×10^{-14}	9.35×10^{-12}
	49.9	0	3.64×10^{-14}	9.72×10^{-12}
	50.1	0	1.14×10^{-14}	1.03×10^{-11}
	50.5	0	4.31×10^{-14}	9.72×10^{-12}

考虑到实际电网中会存在随机噪声，在表 1 参数的基础上加入 40~70 dB 噪声，得到 3 种方法的测量结果，见表 3。结果表明，在有噪声情况下，3 种方法的测量精度均会降低，其中，改进 FFT 方法最易受噪声影响，40 dB 噪声时相角测量误差达 2.29°，相比之下 FFT 和所提方法在噪声条件下的测量精度较好。可见，所提基于多项式拟合的确定性宽频带信号测量方法能够在电网频率波动和含噪声条件下实现精确测量。

表 3 有无噪声情况下 3 种算法测量结果

Tab. 3 Measurement results obtained using three algorithms with and without noise

算法	噪声/dB	最大频率误差/Hz	最大幅值误差/%	最大相角误差/(°)
FFT	40	0	2.80×10^{-3}	0.25
	50	0	9.78×10^{-4}	8.17×10^{-2}
	60	0	6.89×10^{-5}	3.04×10^{-3}
	70	0	1.22×10^{-4}	3.12×10^{-3}
	—	0	1.08×10^{-14}	2.15×10^{-11}
改进 FFT[16]	40	1.02×10^{-2}	3.98×10^{-3}	2.29
	50	2.29	1.22×10^{-4}	0.47
	60	0.47	6.59×10^{-5}	0.25
	70	0.25	1.04×10^{-4}	3.66×10^{-2}
	—	1.07×10^{-5}	1.02×10^{-6}	5.82×10^{-3}
所提方法	40	0	7.23×10^{-3}	0.35
	50	0	5.67×10^{-3}	7.40×10^{-2}
	60	0	9.95×10^{-4}	4.30×10^{-2}
	70	0	4.70×10^{-4}	1.54×10^{-2}
	—	0	6.51×10^{-14}	9.83×10^{-12}

4.2 基于 Simulink 的仿真验证

本文搭建的导纳测量 Simulink 模型如图 6 所示，通过扰动注入模块串联注入三相扰动电压给待测设备，再在提取待测设备的电压和电流信号后，测量出待测设备的导纳。仿真中，在 10~2 000 Hz 范围内取 10、12、15、18、22、27、33、40、60、72、88、107、130、158、193、235、287、349、

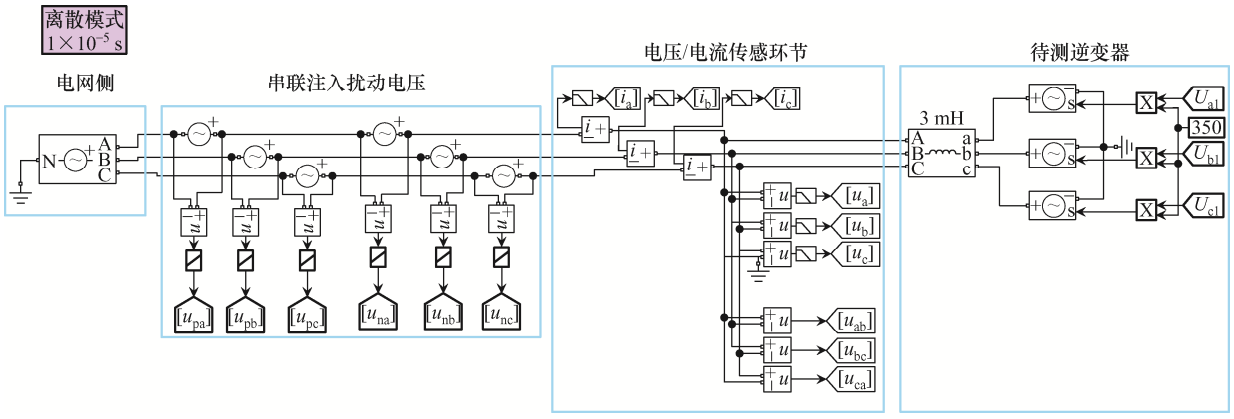


图 6 基于串联注入扰动电压的并网逆变器频率耦合导纳测量模型

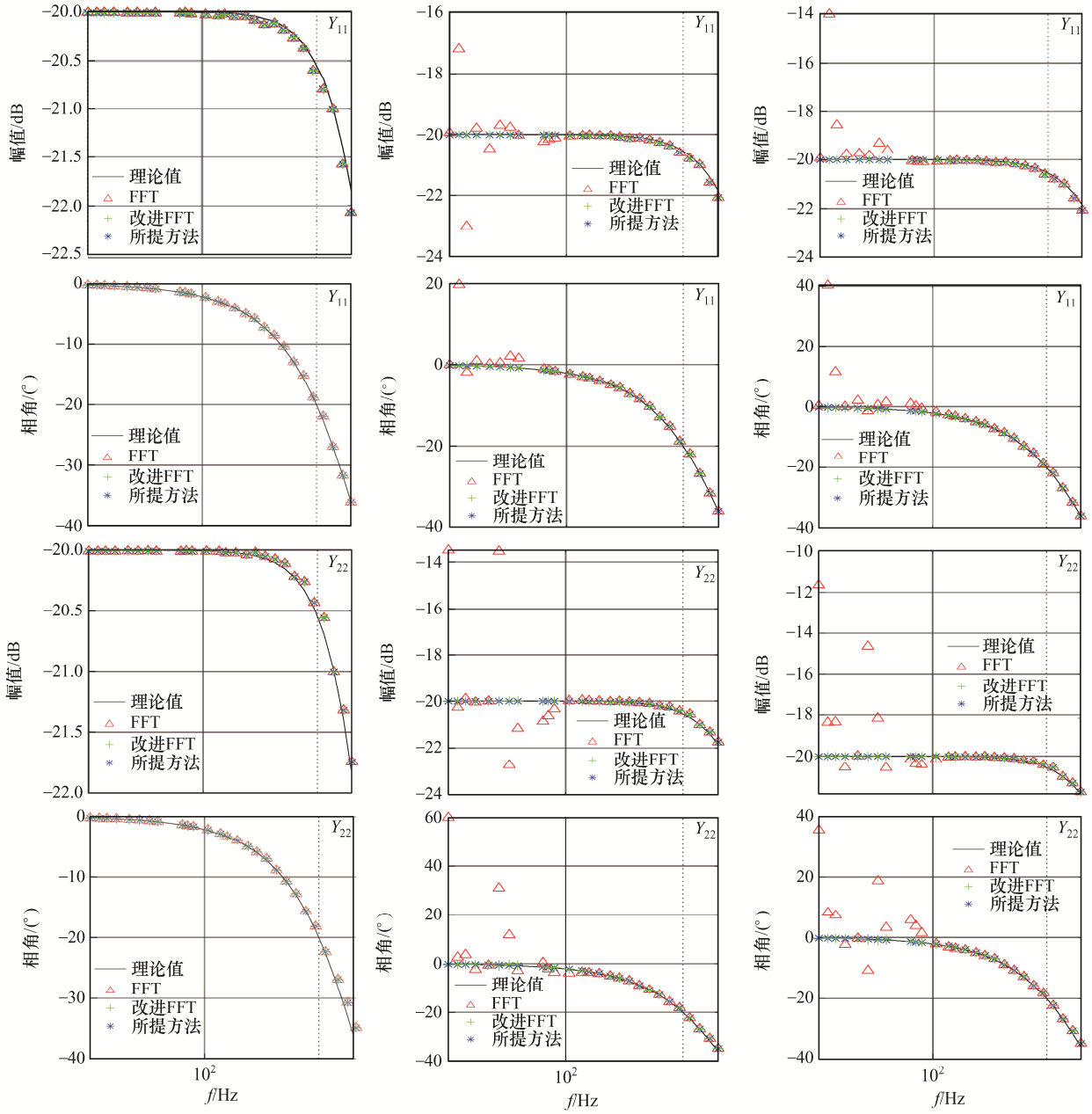
Fig. 6 Model of frequency coupled admittance measurement of grid-connected inverter based on series injection disturbance voltage

425、518、631、769、936、1 141、1 389、1 693、2 000 Hz 作为扰动注入频率。

4.2.1　阻感负载测量

取待测量阻感负载 $Z=R+\mathrm{j}2\pi fL$，其中 $R=10\ \Omega$，$L=5.8\times10^{-4}$ H。电网频率取 50.0、49.9、50.1 Hz，3 种方法在不同电网频率下的阻感负载导纳测量结果如图 7 所示。由于阻感负载没有频率耦合特性，因此不考虑 Y_{12} 和 Y_{21} 的测量结果。由图 7(a)可见，当电网频率为额定频率时，3 种方法的导纳测量结果均与理论值吻合。图7(b)和(c)的结果反映出，当电网频率发生偏移时 FFT 方法存在测量偏差，而改进 FFT 方法和所提方法的测量结果能与理论值吻合。

为进一步体现所提方法的导纳测量效果，统计出电网频率在 49.5~50.5 Hz 内 3 种方法的导纳最大测量偏差，见表 4。可以看出，在阻感负载情况下，



(a) 电网频率50.0 Hz　　(b) 电网频率49.9 Hz　　(c) 电网频率50.1 Hz

图 7　阻感负载的导纳测量结果对比

Fig. 7 Comparison of admittance measurement results for RL load

表 4 阻感负载的导纳测量误差统计

Tab. 4 Statistics of admittance measurement errors for RL load

算法	电网频率/Hz	最大幅值误差/dB	最大相角误差/(°)
FFT	50.0	0.22	1.20
	49.5	10.03	161.14
	49.9	6.50	60.23
	50.1	8.36	40.57
	50.5	10.01	157.43
改进 FFT[16]	50.0	0.22	1.20
	49.5	0.22	1.83
	49.9	0.22	1.20
	50.1	0.22	1.20
	50.5	0.22	1.58
所提方法	50.0	0.22	1.20
	49.5	0.22	1.20
	49.9	0.22	1.20
	50.1	0.22	1.20
	50.5	0.22	1.20

电网频率偏移时 FFT 测量结果有较大偏差，同时随着电网频率偏移的增加，改进 FFT 方法的测量误差也会增大，相比之下所提方法的测量结果不受电网频率变化的影响。

4.2.2 新能源并网逆变器测量

并网逆变器控制原理如图 8 所示，通过图 6 的 Simulink 模型进一步验证所提方法在逆变器并网条件下的导纳测量效果，导纳测量结果如图 9 所示。从图 9(b)和(c)可以看出，频率偏移时 FFT 方法存在较大偏差，改进 FFT 方法受频率影响会出现偏移，而所提方法的测量结果与理论值吻合。

进一步统计出电网频率在 49.5~50.5 Hz 内的导纳最大测量误差，见表 5。可以看出，在逆变器并网情况下，FFT 及其改进方法在电网频率偏移较大时会出现明显偏差，相比之下，所提方法在 3 种电网频率情况下的测量结果基本一致。由此可见，所提确定性分量测量方法能有效避免电网频率变化对导纳测量结果的影响，实现高精度导纳测量。

4.3 实验验证

通过搭建实验平台验证所提方法的有效性，所搭建的 380 V 宽频带导纳在线测量实验平台如图 10(a)所示，实验平台由电源、示波器、电压扰动注入单元、传感单元、导纳计算与监控单元(工

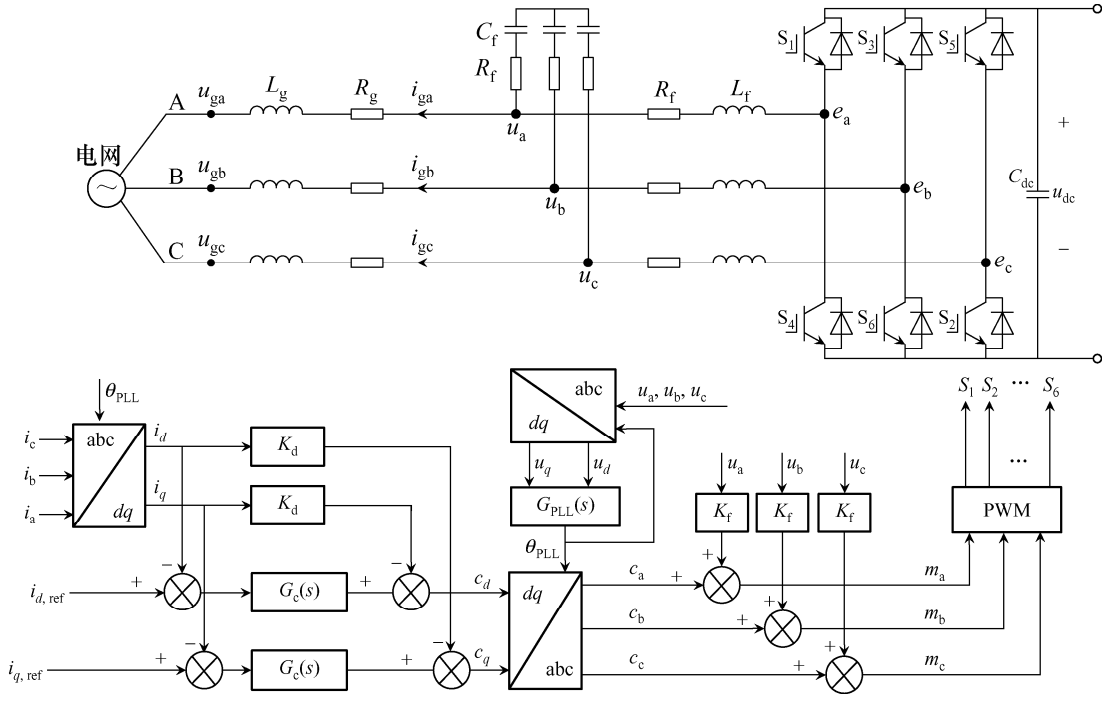
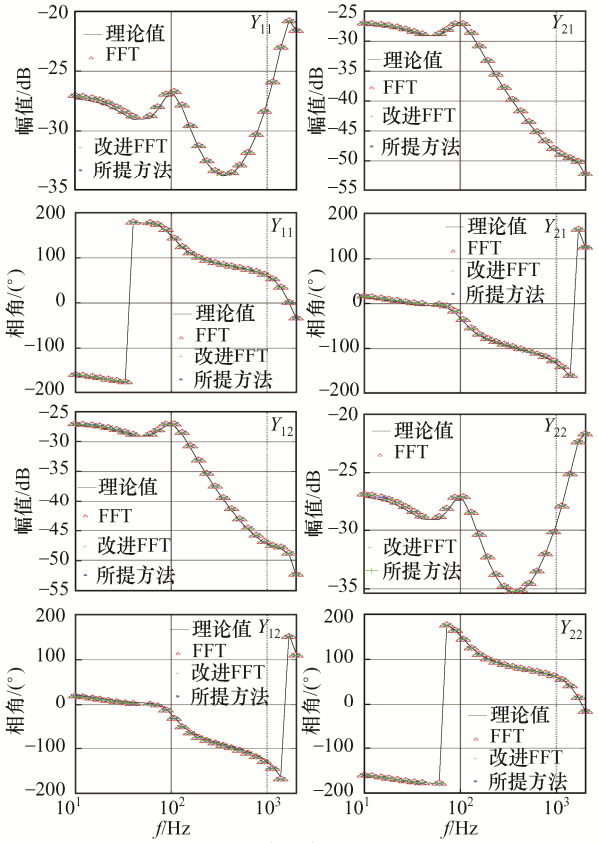
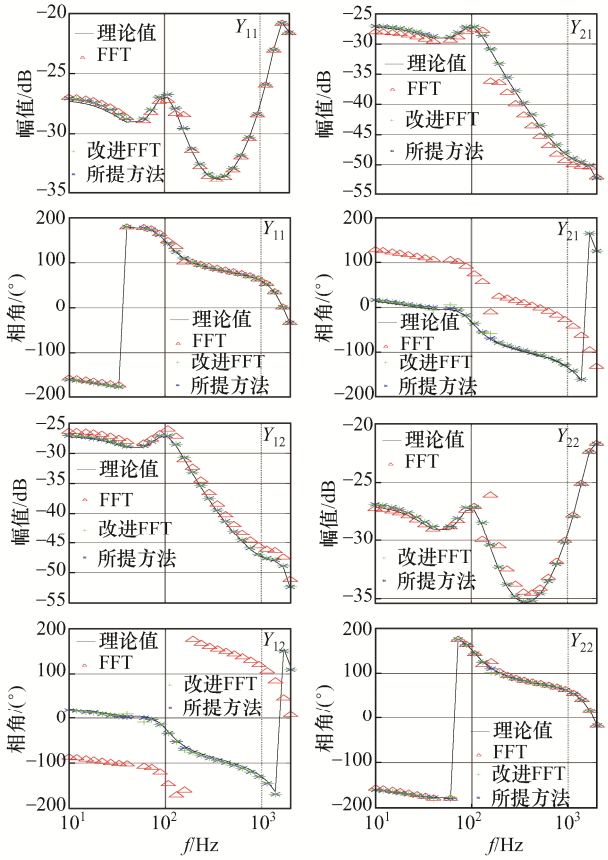


图 8 并网逆变器控制原理

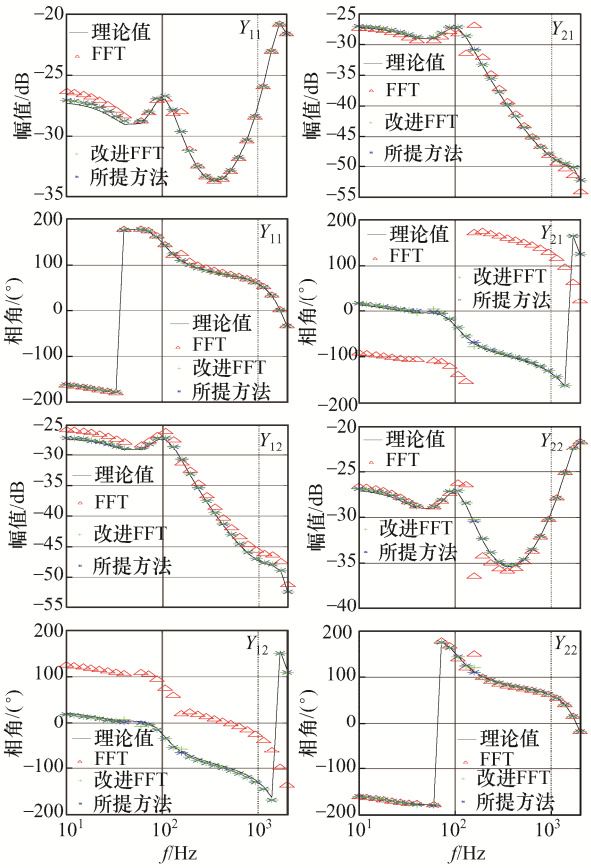
Fig. 8 Schematic of control of grid-connected inverter



(a) 电网频率50.0 Hz



(b) 电网频率49.9 Hz



(c) 电网频率50.1 Hz

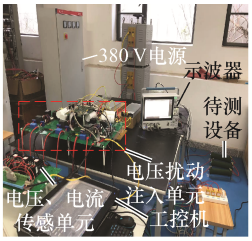
图 9　并网逆变器的导纳测量结果对比

Fig. 9 Comparison of admittance measurement results for grid-connected inverter

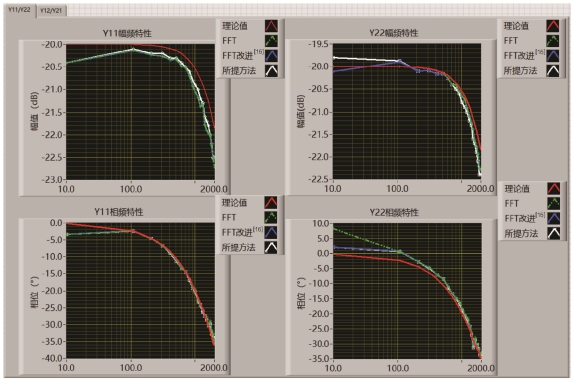
表 5　并网逆变器的导纳测量误差统计

Tab. 5 Statistics of admittance measurement errors for grid-connected inverter

算法	电网频率/dB	最大幅值误差/dB	最大相角误差/(°)
FFT	50.0	0.25	6.39
	49.5	24.10	194.87
	49.9	5.14	259.75
	50.1	5.81	260.39
	50.5	17.45	195.14
改进FFT[16]	50.0	0.25	6.45
	49.5	0.46	20.80
	49.9	0.30	13.31
	50.1	0.38	10.92
	50.5	0.45	30.87
所提方法	50.0	0.29	6.41
	49.5	0.40	6.44
	49.9	0.28	6.44
	50.1	0.30	6.44
	50.5	0.43	6.45



(a) 实验平台



(b) 测量结果

图 10 380 V 宽频带导纳在线测量实验平台及测量结果

Fig. 10 Experimental platform for 380 V broadband admittance online measurement and corresponding measurement results

控机)和待测设备 6 个部分组成。导纳测量过程为：首先电压扰动注入单元向待测设备注入电压信号，然后用电压、电流传感单元和工控机内置采集卡进行信号采集，最后通过工控机进行实时的导纳计算与监控。对与第 4.2.1 节参数相同的实际阻感负载进行测量，并将 3 种方法应用于工控机中，测量结果如图 10(b)所示。可以看出，FFT 方法测量的负序导纳相角会有较大误差，这是由于实际电网频率在 50 Hz 附近波动；相比之下，改进 FFT 方法与所提方法的正、负序导纳测量结果与理论值吻合。由此可见，基于本文所提方法搭建的实验平台可以实现精确的导纳测量。

5 结语

本文提出一种高精度并网逆变器频率耦合导纳测量方法，以解决因电网频率导致逆变器导纳测量精度低的问题。首先根据确定性分量的测量思想，推导了基于多项式拟合的宽频带信号确定性分量测量方法，搭建了基于确定性分量的逆变器频率耦合导纳测量框架；然后通过仿真验证了该方法在多种测试场景下的有效性；最后利用所搭建的实验平台对所提方法进行应用验证。所提逆变器导纳测量框架有望为新能源并网发电设备控制黑/灰箱化破解提供技术支撑。

参考文献：

[1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022(8): 2806-2818.
Zhang Zhigang, Kang Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022(8): 2806-2818. (in Chinese)

[2] 杨冬锋, 生赫, 郝中华, 等. 计及运行灵活性的综合能源系统源荷两侧优化调度[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 165-177.
Yang Dongfeng, Sheng He, Hao Zhonghua, et al. Optimal scheduling on both sides of source and load for integrated energy system with operation flexibility [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 165-177. (in Chinese)

[3] 于国强, 刘克天, 胡尊民, 等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 243-250.
Yu Guoqiang, Liu Ketian, Hu Zunmin, et al. Optimal scheduling of deep peak regulation for thermal power units in power grid with large-scale new energy [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 243-250. (in Chinese)

[4] 蔡晖, 郭瀚临, 张文嘉, 等. 电力电子化受端省级电网宽频谐振稳定性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 159-165, 207.
Cai Hui, Guo Hanlin, Zhang Wenjia, et al. Research on broadband resonance stability of receiving-end provincial power grid with high penetration of power electronic devices [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 159-165, 207. (in Chinese)

[5] 张鑫宇, 薛峰, 李碧君, 等. 双馈风场串补系统次同步

振荡紧急控制策略[J]. 电力工程技术，2023，42(5): 108-116.

Zhang Xinyu, Xue Feng, Li Bijun, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 108-116. (in Chinese)

[6] Sun Jian. Small-signal methods for AC distributed power systems–a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2545-2554.

[7] 张春林，马俊鹏，王顺亮，等. 基于谐振分流的单相串联型大功率阻抗测量装置[J]. 电源学报，2026，24(3): 212-218.

Zhang Chunlin, Ma Junpen, Wang Shunliang, et al. Single-phase series high-power impedance measurement device based on resonance shunt [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 212-218. (in Chinese)

[8] 王利超，于永军，张明远，等. 直驱风电机组阻抗建模及次同步振荡影响因素分析[J]. 电力工程技术，2020，39(1): 170-177.

Wang Lichao, Yu Yongjun, Zhang Mingyuan, et al. Impedance model and analysis of subsynchronous oscillation influence factors for grid-connected full-converter wind turbines [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 170-177. (in Chinese)

[9] 伍文华，蒲添歌，陈燕东，等. 兆瓦级宽频带阻抗测量装置设计及其控制方法[J]. 中国电机工程学报，2018，38(14): 4096-4106.

Wu Wenhua, Pu Tiange, Chen Yandong, et al. Megawatt wide-bandwidth impedance measurement device design and its control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4096-4106. (in Chinese)

[10] Pan Pengyu, Hu Haitao, Xiao Donghua, et al. An improved controlled-frequency-band impedance measurement scheme for railway traction power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2184- 2195.

[11] 潘鹏宇，胡海涛，杨孝伟，等. 基于宽频带扰动的牵引供电系统频域阻抗测量方法[J]. 电力自动化设备，2019，39(2): 153-157.

Pan Pengyu, Hu Haitao, Yang Xiaowei, et al. Frequency-domain impedance measurement method for traction power supply system based on broadband perturbation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 153-157. (in Chinese)

[12] 师洪涛，卓放，杨祯，等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统谐波阻抗测量研究[J]. 电工技术学报，2015，30(8): 257-264.

Shi Hongtao, Zhuo Fang, Yang Zhen, et al. Study of harmonic impedance measurement for three-phase AC power system based on an improved modulated current injection method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 257-264. (in Chinese)

[13] 钟佩军，孙建军，司学振，等. 基于电压扰动源的并网逆变器输出阻抗测量方法[J]. 电工技术学报，2019，34(22): 4739-4750.

Zhong Peijun, Sun Jianjun, Si Xuezhen, et al. Measurement method of inverter output impedance based on voltage disturbance source [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4739-4750. (in Chinese)

[14] 谢志为，陈燕东，伍文华，等. 双模式扰动下新能源发电装备的宽频带序阻抗在线精确测量方法[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9): 2903-2913.

Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. A wide-bandwidth sequence-impedance online precise measurement method for renewable energy generation equipment with dual-mode disturbance [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2903-2913. (in Chinese)

[15] 袁小平，胡秀娟，孙英洲，等. 基于加窗傅里叶变换的弱电网阻抗测量算法[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(10): 96-101.

Yuan Xiaoping, Hu Xiujuan, Sun Yingzhou, et al. A weak grid impedance detection method based on windowed Fourier transformation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 96-101. (in Chinese)

[16] 陈燕东，曹世骧，伍文华，等. 35 kV/1 MVA 宽频带导纳测量装备与频率耦合导纳测量方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22): 8701-8718.

Chen Yandong, Cao Shixiang, Wu Wenhua, et al. 35 kV/1 MVA broadband admittance measurement equipment and frequency-coupling admittance measurement method [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8701-8718.

(in Chinese)

[17] Luhtala R, Alenius H, Messo T, et al. Online frequency response measurements of grid-connected systems in presence of grid harmonics and unbalance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3343-3347.

[18] Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. Admittance modeling and stability analysis of grid-connected inverter with LADRC-PLL [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12272-12284.

[19] Familiant Y A, Huang Jing, Corzine K A, et al. New techniques for measuring impedance characteristics of three-phase AC power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1802-1810.

[20] 许苏迪, 刘灏, 毕天姝. 同步相量测量装置校准器参考相量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 168-175.
Xu Sudi, Liu Hao, Bi Tianshu. Reference phasor calculation method for calibrator of synchronous phasor measurement unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 168-175. (in Chinese)



卓浩泽

作者简介：

卓浩泽(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电学计量。E-mail：zhuo_hz.sy@gx.csg.cn。

林杰(1996—)，男，博士研究生。研究方向：广域同步相量测量技术，电能质量分析。E-mail：linj@hnu.edu.cn。

姚文轩(1988—)，男，博士，教授。研究方向：智能电网，广域同步相量测量技术与应用，电能质量监控。E-mail：wenxuanyao@hnu.edu.cn。

张梓霖(1996—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：电力电子化电力系统。E-mail：zhangzilin1996@hnu.edu.cn。

伍文华(1991—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：电力电子化电力系统，并网逆变器分析与控制。E-mail：wuwenhua168@hnu.edu.cn。

莫枝阅(1989—)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：输电线路运行与在线监测技术，阻抗测量。E-mail：mozhiyue_csg@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)

(上接第 231 页)

based adaptive sliding mode control for three-phase photovoltaic grid-connected system [J]. IET Power Electronics, 2023, 16(15): 2577-2591.

[17] 武健, 张彩红, 王蕊, 等. 基于三阶广义积分器的谐波检测算法[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 131-136.
Wu Jian, Zhang Caihong, Wang Rui, et al. Harmonic detection algorithm based on third-order generalized-integrator [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 131-136. (in Chinese)

[18] 屈艾文, 陈道炼, 苏倩. 三相准 Z 源并网逆变器的简单升压改进空间矢量调制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 826-836.
Qu Aiwen, Chen Daolian, Su Qian. Simple Boost modified space vector modulation strategy for three-phase quasi-Z-source grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 826-836. (in Chinese)

[19] Chen Wei, Zhang Yan, Tu Yiming, et al. Active damping control for LCL filters with inverter-side current feedback only [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10065-10069.

[20] 李智, 曾垂辉, 谢俊, 等. LCL 型并网逆变器电容电流反馈有源阻尼特性通用图形化评估方法及应用[J]. 电源学报, 2025, 23(8): 60-69.
Li Zhi, Zeng Chuihui, Xie Jun, et al. General graphical evaluation method for capacitor current feedback active damping characteristics of LCL grid-connected inverter and its applications [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(8): 60-69. (in Chinese)



屈艾文

作者简介：

屈艾文(1980—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：新能源发电技术，微网控制技术。E-mail：awqu@fzu.edu.cn。

韦道洲(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术。E-mail：3104675319@qq.com。

薛建华(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术。E-mail：2907904836@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)